

建筑生命周期碳排放基准设定技术路径

——以寒冷地区学校建筑为例

Methodology of Life Cycle GWP Benchmarking for Buildings

—Taking a Primary School in the Cold Climate Zone for Example

李奇芫
杨巍 *
LI Qiyuan
YANG Wei*
文章编号： 1672-9080(2023)08-0352-09
DOI： 10.19974/j.cnki.CN21-1508/
TU.2023.08.0352
中图分类号： TU201.5
文献标志码： A
收稿日期： 2022-01-04
修回日期： 2023-06-13
基金项目： 国家自然科学基金项目“生命周期环境影响和成本耦合目标下的参数化建筑设计方法研究”（批准号：51878436），“基于 BIM 的建筑生命周期环境与经济评价及优化设计方法研究”（批准号：51478294）。

摘要：在设计阶段采用生命周期评价（Life cycle assessment, LCA）方法进行方案的预评价，对于提升建筑的环境性能有很大助益。在评价过程中，需要依据基准值对计算结果进行衡量，并反馈到设计阶段进行改进。目前，我国可用于建筑全生命周期环境性能评价的基准数据尚未确定，为完善评价结果的阐释和反馈过程，本研究首先梳理了“基准值”的相关含义与分类，参考国内外研究成果从三个层级（政策层、本体层、构件层）归纳了建立基准值的相关方法，并阐释了这些方法在国际典型可持续建筑评价体系基准值设定中的应用。在此基础上，以寒冷地区学校建筑为例，通过国家宏观目标和节能规范的推导，计算出“政策层”基准值，结合典型案例计算“本体层”基准值，并将二者的结果进行对比验证，提出建立本土建筑生命周期碳排放基准值的技术路径，进而在评价结果阐释中根据不同的节能目标划分评价等级，提供简明高效的评价结果表达方式。

Abstract: In the design phase, the use of life cycle assessment (LCA) for pre-evaluation of the project is of great help to improve the environmental performances of buildings. In the evaluation process, benchmarks are important for interpreting the LCA results and feeding them back to the design process for improvement. So far, the benchmark values that can be used to evaluate the environmental performances of Chinese buildings over their full life cycle had not yet been determined. In this study, the definition of "benchmarks" is sorted out, and then the methods for establishing benchmarks from three levels (policy level, building level, component level) and the application of benchmarking in typical sustainable building assessment system are summarized. On this basis, taking a primary school building in China's cold climate region as an example, deducing from the national macro target and energy-saving standards, the "policy layer" as well as the "building level" benchmark values are deduced. By comparing and validating the results, the methodology for establishing the benchmark values for life cycle carbon emission of school buildings in the specific climate zone is proposed, and the levels of certificate are defined according to different energy-saving goals so as to provide a concise and efficient way of conveying the evaluation results.

关键词：建筑生命周期评价；基准评价；基准值；碳排放；环境性能

Keywords: building life cycle assessment; benchmarking; benchmark; GWP; environmental performance

作者简介
李奇芫，博士在读，女，主要研究方向为基于 BIM 的建筑生命周期评价。E-mail：qiyan_li@tju.edu.cn。
杨巍，博士，女，教授，主要研究方向为 1. 建筑生命周期评价与设计；2. 建成环境可持续更新；3. 面向碳中和的建筑设计与建造和运维。E-mail：walker_yang@tju.edu.cn。

在过去的十几年中，生命周期评价（Life cycle assessment, LCA）在建筑设计领域的应用有了飞跃性的发展。对于设计师而言，在设计过程中对建筑生命周期性能的分析和对结果的阐释比最终的评价结果更具有辅助意义。然而，现阶段多数生命周期评价工具关注于数据和计算方法的完善，而在设计参数反馈

和评价结果的简明阐释方面则略显不足^[1]。对我国建筑生命周期评价来说，阻碍其在实践中应用的更深层次的原因，是缺乏一套可供参照的基准值，以便对不同类型和不同设计阶段的建筑进行快速评价。基准值以及基准评价（benchmarking）作为 LCA 结果阐释工作中的重要环节，是连接建筑特殊性与普遍性的桥

* 通信作者（Corresponding author）E-mail：walker_yang@tju.edu.cn。

梁。完善的基准评价过程有助于快速准确地判断建筑综合性能的优劣。本文在归纳研究国内外建筑生命周期基准评价方法与应用的基础上，提出“自上而下”与“自下而上”相结合的基准值设定路径；并以此为基础，建立了简明、可视化的结果反馈方式，以辅助设计过程的方案改进（图1）。

1 建筑“基准”的含义与分类

1.1 建筑“基准”的相关含义与分类

建筑领域的基准评价（benchmarking）可以解释为预先设定基准值，通过与之对比来判断建筑性能相对优劣的过程。这是一种系统而连续的分析 and 比较过程，通过设定多层次基准数值对建筑设计方案的生命周期性能进行衡量，范围可覆盖整个设计流程，以便确保最终方案具备优良的性能。

对照各类标准进行自检和预判是建筑设计过程中的必要步骤。与必须严格执行的“标准”相比，“基准”的应用范畴更宽泛：它包含“参考”的意义，通过比对进行方案性能的定位。基准评价方法的应用，不仅可以辅助建筑设计人员进行方案改进，还可以对方案的整体性能进行评估。所建议的基准值通过在实际中的验证，能够对政策和标准的制定予以反馈，为开发与与时俱进的标准和评价体系提供参考。

基准评价可分为相对比较（relative comparison）和绝对比较（absolute comparison）。相对比较是指与原建筑具有相同功能、相同气候条件下的其他建筑进行比较。绝对比较是指与标准、政策中预设数值相比。相对比较的过程更加具体、细致，而绝对比较则侧重于方向的把控。也有学者根据经济学分类的方式，将基准值分为内部和外部的基准设定，外部基准设定是依据同类建筑已经归纳出的阈值，或者是国家已经计算出的标准和统计值；内部基准设定则是与目标项目具有相同条件的“参考建筑”相比较，侧重建筑性能的“对比优化”。

1.2 基准值的层次划分

2020 年出版的国际标准 ISO21678《建筑和土木工程可持续性》（Sustainability in buildings and civil engineering works）^[2]中包含基准和指标的定义与使用内容。为评价建筑在环境、经济、社会等方面的性能提供了一个基本原则。ISO21678 文件提出，基准值不是某一个值，而是可以通过一组取值范围对建筑性能进行考量，大体可以分为极限值、参考值、目标值。这样的一组数值既可以确定评价主体的性能等级，又可以通过不同层级的目标设定，

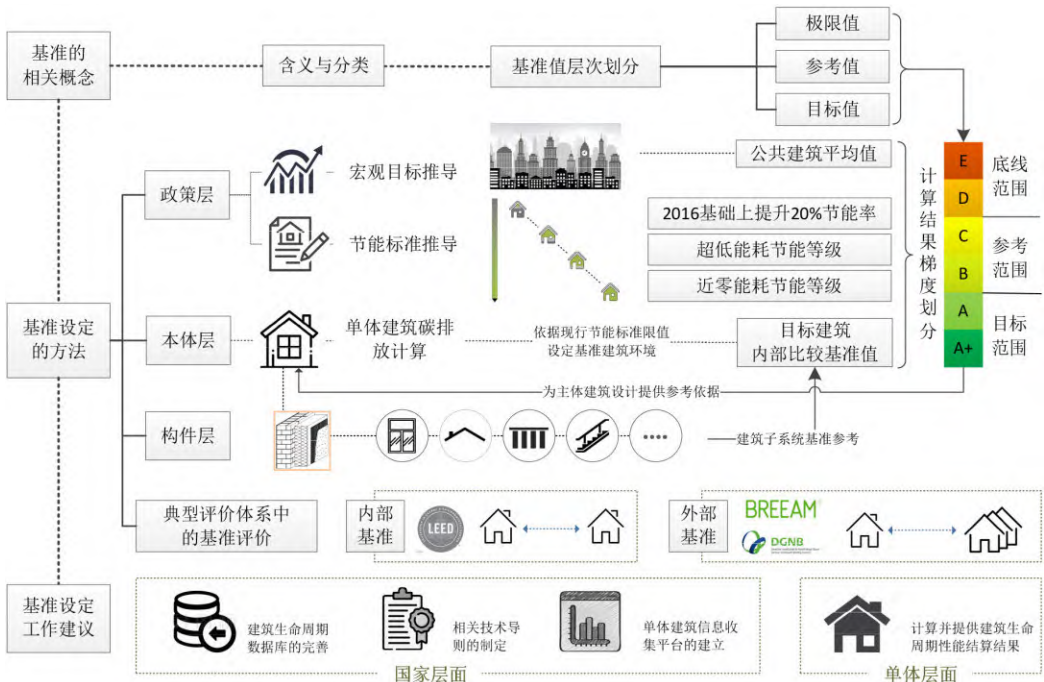


图1 建筑生命周期碳排放基准设定技术路线图

激励更高标准的建筑方案改进。

极限值是指同类建筑中，可接受的最大或最小值。它为基准值数组提供了一个边界点，这类数值大多见于国家或地方制定的标准中，为建筑的设计条件规定上限或下限。

参考值指代建筑普遍的性能状态的典型值。它的来源更加广泛，可以是同区域同类型的建筑统计结果的平均数、中位数或是众数，也可以来源于示范项目和根据理论分析构建的具有代表性的参考建筑。

目标值通常代表了同类建筑的较高水平。也可视作一种高性能方案设计趋势的引导值。比如在我国《民用建筑能耗标准》中设定的“引导值”^[3]。

2 建筑碳排放基准值设定方法

2.1 基准值的确定方法

建立基准值可分为自上而下（Top-bottom）的方法和自下而上（Bottom-top）的方法。建筑运行阶段的能耗基准模型应用得较早，首先出现的是自上而下的模型，即根据国家既定的节能目标来推导基准值。随后，为配合国家能源计划的制定与实施，以典型单体建筑为基础的自下而上的计算方法得以发展。它从可控的部分出发，首先分项计算单体或者一类典型建筑的能耗值，再通过加总的方式预测总体能耗量的参考范围。自下而上模型可分为物理特性模型、统计分析模型和混合型模型^[4-5]。

未来建筑使用能耗大幅降低，意味着生命周期视角下的环境性能将成为评判建筑的新标准。与运行能耗基准值不同，建筑生命周期基

准值涵盖的时间维度更广，数据要求更全面，涉及的相关行业和性能评价指标也更多。所以，生命周期基准值在沿用能耗基准值建立方法的基础上，需综合考虑建筑各要素对生命周期全过程整体性能的影响。下文将从“政策层”“本体层”“构件层”三个层面阐述基准值的确定方法。

2.1.1 “政策层”基准值推导

“政策层”基准值是指从国家或区域政策、目标和标准的导向出发，为建筑方案制定参考依据。从“顶层设计”把控建筑的环境、经济效益，基准值的计算结果具有很好的导向性。

根据切入点的不同，具体方法可细分为两种：依据宏观目标和统计数据推导，以及依据节能标准计算。前者数据主要来源于宏观统计或是中长期节能目标，这种方法不仅对当前建筑的评价起到规范和引导作用^[6-7]，还可以根据不同时期政策的变化，进行基准线走势的预测^[8]。然而，这种方法难以体现建筑类型与所处环境的特异性。我国幅员辽阔，各地区各类型的建筑显然不适宜使用唯一的基准进行评判与衡量。而后一种方法的计算一般基于国家制定的节能标准，可以从建筑类型、地理环境等细节上一定程度的弥补宏观基准数据的不足，但规范中的分类通常比较笼统，未必能够与评价对象的具体特征对应。

2.1.2 “本体层”基准值计算

“本体”指着眼于单体建筑样本本身的基准值研究，这是建筑基准值计算的核心内容。本文把“本体层”计算基准值的方法分为以下三类：

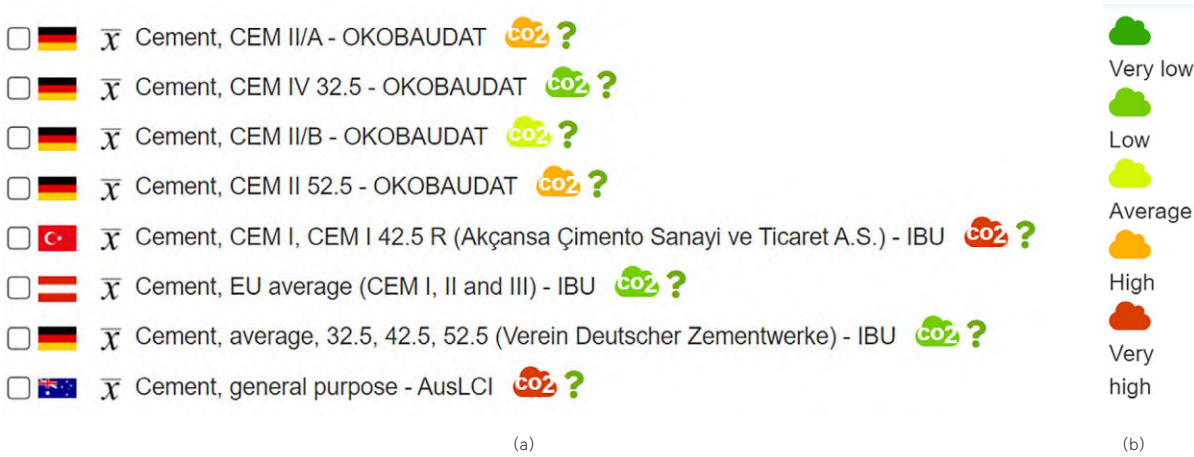


图2 OneClick LCA 中的材料与隐含碳排放基准评价示例：(a) 材料的 CO₂ 云；(b) 材料隐含碳排放的梯度等级^③

(1) 案例样本的统计分布

属于与同类建筑“相对比较”中最直接的方法，样本来自某类建筑存量的真实数据。例如，Koning^[9]在BNB^①的框架下，选取了40个住宅样本，并分类进行统计分析，得出三个层级的基准值。彭渤^[10]利用BELES计算了近40个建筑实例，得出了住宅与公共建筑生命周期碳排放分布情况。随着节能建筑的快速发展，基于建成建筑样本数据的计算具有一定时效性，取样需实时更新，才能动态地用于符合当下节能标准的建筑。全美建筑能耗数据库（Commercial Buildings Energy Consumption Survey, CBECS）每4年收集并更新新建建筑的能耗数据用于能源之星（Energy Star）计划的基准测评^[11]。然而，由于建筑生命周期环境影响的计算内容较为烦琐，逐一处理真实完整的样本数据工作量较大。

此外，如果样本数量过少，且有部分异常值，则结果不具代表性，从而失去作为基准值的意义^[12-13]。现阶段，我国尚未建立起基于建筑LCA的基准值体系，获取基准评价所需的LCA数据还需要对大量样本进行再加工，因此该方法更适用于国家或区域范畴的统计分析。

(2) 单一原型建筑的性能计算

原型建筑的数据来源分为两种，一种是基于统计数据，提取出典型的参数，用于指导建立具有代表性的虚拟模型；另一种是在标准或政策的框架下，采取真实或者是假设建筑作为原型建筑。这种方法的优势在于信息充足，可以反映建筑各部分的具体情况。此外，利用“原型建筑”建立“基准流”的方法更多地用于城

市存量的基准值的研究^[14-15]。典型建筑不仅具有同类建筑的典型空间、形态、用材，还具有某一年代的特征，在存量发展阶段的划分中也具有重要意义。

在关于建筑能耗的研究中，原型建筑是一个较为常用的方法。例如任彬彬^[16]以一栋多层办公建筑为基础，为设计初期提供可参照的数据模型，并多角度探讨建筑能耗的影响因素。由于不同建筑用材、施工方式大有不同，单一原型建筑提供的空间形式变化范围有限，直接影响材料算量的统计分析。特别是现阶段非使用阶段的影响占比越来越大，单一原型建筑的适用范围较窄，难以为同类建筑的生命周期性能提供“外部基准”。相比之下，针对特定建筑进行“内部基准”设定并进行方案的优化改进，在生命周期的维度下更具灵活性，它适用于建筑样本和市场信息缺乏的情况，但是所定义的参考建筑本身只针对特定目标建筑及其特定阶段，对于整个建成环境参考价值较小。

(3) 基于随机生成样本的统计分析

该方法把参数优化和统计分析相结合，通过收集实际建筑案例的关键参数信息，得到建筑形体的可能性解集，对形体生成和计算结果两部分进行基于计算机工具的处理分析。这类方法适用于无法收集大量样本的情景，它能很好地降低因样本数量不足引起的数据不确定性，但是对数据分析的方法要求较高。

通过关键参数生成建筑样本的方法更多地用于敏感性分析和方案之间的优化比选^[17-18]。Zsuzsa Szalay^[19]首先通过调查确定各因素的取值范围，然后利用Excel随机生成1000个建筑

样本，提取其中数据进行LCA分析，在进行敏感性分析的同时，计算了三类住宅的环境影响及其结果的分布。虽然随机生成的方法解决了样本的数量问题，但是样本的完善程度与真实案例相比有明显的不足。我国的建筑多样性很强，单纯依赖于有限的参数控制样本生成无法覆盖变量之外的建筑要素特征。

2.1.3 “构件层”基准值计算

“本体层”基准评价可以为建筑方案提供较为具体的参考依据，但是最终的基准数值主要是针对建筑的整体性能，对于建材或建筑部品环境性能的评价仍然存在于这个总体数值范围的“黑箱”中。Hollberg^[7]依据瑞士建筑构件（材料）的市场占有率作为权重，对瑞士建筑造价规范（BKP-H）^②中的常用构件的隐含温室气体排放值进行加权计算，取对数分布的前5%为目标值，为建筑基准值评价体系提供了新的思考方式。One Click LCA^[20]中的“绿色建材基准”为材料的碳排放强度提供了相应的颜色代码：用一个形象的“CO₂云”来表示材料的相对排放，以便用户可以选择更绿色的材料（图2）。

尽管从建筑构件的“微观”视角进行基准评价可以从另一种角度反映建筑子系统的性能，提醒设计人员关注设计材料选择与整体建筑的关系。然而根据中国现阶段的数据可获得性，难以取得较为客观的各类建材使用频率数据，这会使基准值计算的准确度受到较大限制。同时，新材料新技术不断涌现，材料和构件的选择所带来的建筑生命周期过程中各个阶段的性能变化是联动的，因此不能单凭现阶段的构

件基准值简单评判，而忽略了建筑的整体性和长期性。

2.2 典型建筑可持续建筑评价体系中的基准值与基准评价

作为建筑可持续性评价体系中的重要的评分依据，建筑生命周期环境性能的基准值通常是通过统计分析结果或定义参考建筑来制定的。不同的评价体系中，基准建立的方法及其含义也各不相同。它可以是标准值（参考值、平均值）、引导值（目标值），或是获得认证的最低要求（底线值）^[26]。

在可持续建筑评价体系中常用的两种方式分别为内部基准与外部基准。使用外部基准的认证体系有英国的 BREEAM 和德国的 DGNB。BREEAM 中针对 LCA 的基准值，使用的是认证建筑统计的 Ecopoint 平均值，建筑类型覆盖办公、零售、工业，目前版本的 LCA 基准评价仅针对建材部分^[27]。DGNB 的基准数据基本覆盖建筑生命周期的各个阶段，包含“全球变暖潜势值”（碳排放）等 6 个环境影响指标，并提供了主要环境影响类别的底线值、参考值、目标值，还进一步设置了“超额目标值（数值为参考值的 0.55 倍）”以鼓励更高水平的可持续设计。基准评价过程将目标建筑与参照建筑的各项指标对比，通过具体的换算公式推导出参评建筑的得分^[28]。

美国的 LEED^[29] 则是使用内部基准进行评价的典型代表，它通过用户自定义“基线建筑（baseline building）”来进行基准评价。“基线建筑”必须反映项目地点和建筑类型的标准设计实践和典型材料选择，并且与目标建筑具有相同的使用寿命。这种内部基准的方式侧重于设计的优化，即在标准上进行方案的对比与改进，但是基线建筑不具有普适性，属于虚拟建筑。

3. 中国背景下建筑生命周期碳排放基准值的建立

2019 年，第 71 届 LCA 论坛总结了当前国际范围内建筑 LCA 基准体系建立中的主要问题^[32]，从相关探讨中我们可以得出启示：（1）建筑碳排放基准值必须基于本国国情。在中国“双碳”目标下，设立本土的建筑基准值势在必行。（2）基准值具有时效性，需要与当下的建筑节能背景与目标相匹配。（3）基准值的设定需考虑地域与建筑类型的差异，以保证更具针对性的结果反馈。

根据上文讨论的基准值建立的方法，以寒冷地区（天津）小学建筑为例，采用“自上而下”和“自下而上”相结合的方式，从政策层和本

表 1 各层次基准值建立方法优劣性总结

方法分类		代表文献	优势	局限性
政策层		文献 [6-8]	(1) 基于宏观目标 (2) 不需要细节性描述，整体性快速评价 (3) 便于环境、经济、社会综合性能评价与趋势预测	缺乏技术细节，无法反映建筑具体情况
建筑本体层	方法 1 真实样本统计	文献 [9][11][13][22][23]	数据翔实，可反映当前既有建筑的整体性能水平	(1) 结果的代表性和准确性受样本数量和质量制约较大 (2) 对存量数据和市场信息的完善程度要求高
	方法 2 典型建筑原型	文献 [5][15][16][24][25]	(1) 细节充足，可反映不同时期节能标准下建筑的性能变化 (2) 直观地展现方案性能的改进	(1) 单一原型建筑忽略了建筑空间，构造变化的多样性 (2) “内部”参考建筑的基准数据不具普适性
	方法 3 随机样本生成	文献 [19]	样本数量充足，建筑多样性强	无法体现设定变量之外的元素细节
构件层		文献 [7][12][20][21]	明确建筑中各构件的性能定位，可以直接作用到方案中材料构造的改进	对建筑的生命周期整体性考虑不足。无法及时地体现新技术、新材料的发展对基准带来的影响

表 2 典型建筑可持续建筑评价体系中的基准值设定与评价方式对比^[30-31]

评价体系		BREEAME	DGNB	LEED
基准值		Ecopoint ④平均值	超额目标值 一般目标值 参考值 临界值	基线建筑
基准评价方式	根据基准值计算得分	外部基准	外部基准	内部基准
		根据与既定 Ecopoint 平均值相比的差值比例计算得分	与参考值相对比，划分各分项指标的性能等级，对应得分	与参考建筑性能对比，根据对应的指标降低幅度，对应得分
基准值数据来源		数百个 2011 年和 2014 年版本下认证的新建建筑的数据	1. 经过 DGNB 认证的真实案例 2. 制造、维护和建筑生命终止阶段的相关统计研究 3.DGNB 在环境指标方面的长期目标 4. 电力环境概况及典型热能构成的当前系数	用户自定义，符合当地典型建筑的做法，反映项目地点和建筑类型的标准设计实践和典型材料选择。且与目标建筑具有类似的尺寸、功能、朝向和运行能源性能
生命周期范畴	A1-A3 ⑥	·	·	·
	A4	·		至少包括 A4
	A5	·		
	B1-B4	·	·	至少包括 B1-B5 中的一个模块
	B6		·	
	C1-C4	·	·	包括至少一个来自 C1-C4 的模块
	D	·	·	
建筑寿命		60 年	50 年	与目标建筑相同，至少 60 年
包含的生命周期评价指标		GWP, FW, ODP, AP, EP, RWD, ADP-E, POCP, HWD, ADP-F, NHWD ⑤归一化处理	GWP, ODP, POCP, AP, EP, PEnr, Per	GWP, ODP, POCP, AP, EP, NPED GWP 指标必须包含，此外，在评价体系规定的影响指标中自行选择 2 种。

体层两个层面，阐释建立建筑生命周期碳排放基准值的方法路径。

3.1 “政策层”基准值的建立

2020 年，我国提出了 2030 年碳排放总量达到峰值，2060 年实现碳中和的目标^[33]，同年 12 月，习近平总书记在气候雄心峰会上进一步提出：到 2030 年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65% 以

上^[34]。为了配合我国节能减排目标的实现，相关的建筑节能减排标准陆续出台，为本土碳排放的基准设定提供了可靠依据。下文从“自上而下”的宏观目标和“自下而上”的节能标准两个角度分别计算建筑的碳排放。

根据统计数据，2005 年全国 GDP 碳强度为 2.1tCO₂/万元^[35]，依据最新的减排目标，得到 2030 年全国碳排放上限为 0.7 tCO₂/万

元。通过参考文献^[36]对我国未来GDP发展的预测数据,计算2030国内碳排放总量为123.5亿tCO₂。统计数据显示^[37],建筑行业运行阶段碳排放约占全国总量的21%,城镇居住建筑、公共建筑、农村居住建筑的碳排放占比分别为42%,37%,21%。随着未来的城镇化率的不断攀升,城镇居住建筑和公共建筑的用能强度还会不断增加,但同时建筑行业能源结构也正在不断优化,电力碳排放因子在逐年下降。因此,假设到2030年建筑运行阶段碳排放占比不再增加,则建筑部门运行阶段碳排放最多为30.6亿tCO₂,公共建筑碳排放的上限约为11.3亿tCO₂。

我国公共建筑的人均面积与世界发达国家相比还有差距,所以在未来,公共建筑面积还将不断增加,以中等速度发展,文献^[38]预测2030年我国公共建筑面积约为210亿m²,则在2030年公共建筑运行阶段平均碳排放强度的上限为51.4kgCO₂/m²/a。隐含碳排放引用文献^[39]的数据,计算公共建筑生命周期碳排放为64.2kgCO₂/m²/a。

从宏观数据可以得出建筑平均碳排放的目标值,然而影响公共建筑碳排放的因素众多,计算结果对于特定地区和特定类型的建筑不具针对性。多位专家学者的预测表明^[39-43],不断提高强制性节能标准能效,尽早强制性的实施超低能耗及更高的建筑节能标准,将有助于提前碳达峰时间,同时有效降低碳排放峰值。

目前中国建筑全生命周期碳排放没有官方基准,且我国地域辽阔,建筑类型多样,不同气候区,不同种类建筑的碳排放量差异大,在碳达峰的路径中需要部分建筑达到更高节能目标来平衡不具备条件地区的较高能耗建筑的碳排放。因此,对特定地区、特定建筑类型进行不同节能目标下的建筑碳排放标准推算更具参考意义。本文尝试根据国家政策、标准、文献调查数据对天津(寒冷地区)小学类建筑进行基准值推导,以补充和验证上文依据宏观数据提出的基准限值。

根据《民用建筑能耗标准(GB/T 51161—2016)》(以下简称《2016 节能标准》)^[3]中寒冷地区供暖能耗指标约束值、目标值以及《中国清洁供热产业发展报告(2020)》^[44]中的供暖能源结构计算建筑供暖碳排放,同时计算公共建筑非供暖碳排放(采用的电力碳排放因子是2019年华北区域电网的OM值:0.9419t/MW·h)可得到运行阶段总能耗(表3)。

根据2021年10月国家标准《建筑节能与可再生能源利用通用规范(GB 55015—2021)》(以下简称《通用规范》)^[45]、《近零

能耗建筑技术标准(GBT 51350—2019)》(以下简称《近零标准》)^[46]中关于降低能耗与碳排放的规定(表4),以《2016 节能标准》^[3]中能耗标准推算的结果为基准进行折减,并假设超低能耗和近零能耗建筑冬季采暖采用热泵系统,可以不依赖化石能源^[51]。得到符合标准^[45, 46]定义的建筑运行阶段能耗,并计算相应的碳排放。非运行阶段的碳排放以现阶段建筑隐含碳排放^[39]为基础,并对超低能耗节能水平以上的建筑考虑了高性能设备和可再生能源利用装置的加设,根据文献研究估算比例和经验数据进行增量估算(表5)。依据《碳排放计算标准(GB/T 51366—2019)》(以下简称《碳排放标准》)^[47],假设建筑寿命为50年,将计算出的各阶段碳排放加总,得出不同节能目标等级建筑生命周期单位面积的年均碳排放量(表3)。

3.2 “本体层”基准值的建立

政策层的基准值细节性欠缺,地域性和建筑类型的都相对笼统,需要“底层”数据为设

计人员提供更加具体明确的对比内容。

依据上文总结的3类“本体层”基准值建立方法特性可知,作为独立研究者,收集大量真实案例并且逐一计算工作量巨大,而随机生成的方法只针对特定变量,选择以一栋或几栋建筑为样本建筑进行“外部基准”的建立,普适性较弱。对于具体的案例,基准评价的最终目的是进行方案反馈与支持方案的改进,因此,为保证基准值的适应性和数据的精度,本文采取针对不同设计阶段的“内部比较”的方式建立基准值。

这种方式的优点在于:第一,针对性强,无须考虑基准值是否具有普适性;第二,可以根据方案的设计深度实时调整,给予方案有效反馈。在方案初期,模型精度较低,相应的建筑整体生命周期性能指标的计算总值较低,随着方案的深化,建筑细节性的信息增多,计算结果也会随之增加。因此,在不同的设计阶段,“基准值”的参考水平也需有差异。若在方案早期依据已建成案例计算的生命周期碳排放指

表 3 寒冷地区小学建筑不同节能目标等级碳排放推算

节能目标等级	运行阶段碳排放 / kgCO ₂ ·m ⁻² ·a ⁻¹	运行阶段能耗 kgce/m ⁻² ·a ⁻¹	非运行阶段碳排放 / kgCO ₂ ·m ⁻² ·a ⁻¹	生命周期碳排放总量 /kgCO ₂ ·m ⁻² ·a ⁻¹	参考文献
2016 节能标准 (约束值)	78.3	26.6	12.8	91.1	[3][39][44]
2016 节能标准 (约束值)	63.6	21.4	12.8	76.4	
通用规范 (约束值)	46.9	19.1	12.8	59.7	[39][45]
通用规范 (目标值)	38.2	15.4	12.8	51.0	
超低能耗建筑	29.9	13.2	13.1	43.0	[46][48-50]
近零能耗建筑	19.5	10.5	13.3	32.8	
零能耗建筑	0.0	0.0	13.4	13.4	

表 4 现行国家标准中降低建筑能耗和碳排放的相关规定

节能标准 能耗指标	民用建筑能耗标准 (GB/T 51161—2016)		建筑节能与可再生能源利用通用规范 (GB 55015—2021)	近零能耗建筑技术标准 (GBT 51350—2019)	
	约束值	目标值		超低能耗	近零能耗
采暖耗热量指标 / GJ·m ⁻² ·a ⁻¹	0.25	0.20	能耗水平降低 20% 碳排放平均降低 40%	综合节能率下降 ≥ 50%	综合节能率下降 ≥ 60%
非采暖能耗指标 kW·h·m ⁻² ·a ⁻¹	55	45			

表 5 非运行阶段碳排放增量估算

节能目标等级	普通节能建筑	超低能耗建筑	近零能耗建筑	零能耗建筑	参考文献
非运行阶段碳排放 / kgCO ₂ ·m ⁻² ·a ⁻¹	12.8	13.1	13.3	13.4	[48][49]
碳排放增量	-	2%	4%	5%	

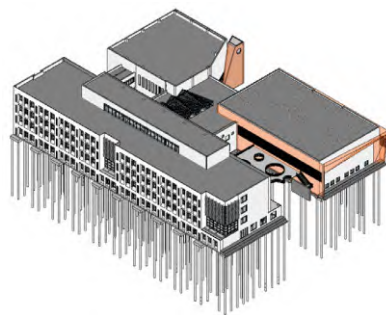


图 3 (a) Revit 模型的建立

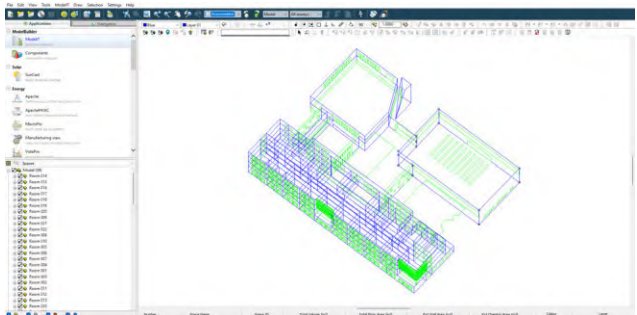


图 3 (b) 能耗模拟模型的建立

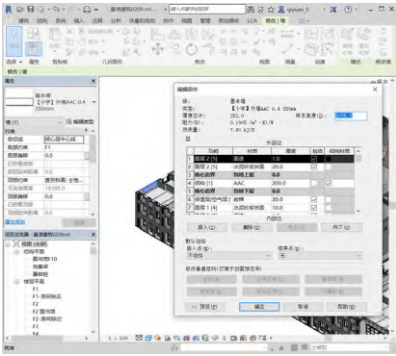


图 3 (c) 定义建筑构件的材料组成



图 3 (d) 工程量清单的提取

标进行衡量，结果反馈意义不大；第三，具有实效性，如以样本随机生成结果或是既有真实案例的统计数据作为基准，在建筑节能标准不断提升的背景下，计算结果相对滞后。而“内部比较”的方法根据现行标准生成准建筑，与时俱进，建筑的性能指标更具参考价值。

基于课题组开发的 BIM-LCA 方法，下面以天津（华北）地区某小学建筑为例，进行基准建筑建立方法的具体阐述。建筑生命周期碳排放的计算范畴依据《碳排放标准》与上文“政策层”保持一致，包括建材生产运输、施工、运行、维修替换、拆除处理。建筑的基础数据主要包括：(1) 几何形体；(2) 材料组成；(3) 热工参数；(4) 设备系统参数。其中，基准建筑的几何形体根据目标建筑的变化而变化，在建模的同时即提取了建筑形体与建筑材料的几何参数，建筑材料与构件的设定需要符合现行节能标准，热工参数和设备的系统参数根据国家或者地方标准的底线值直接输入能耗模拟软件中进行计算。

3.2.1 建筑几何形体的建立与信息提取

在 Revit 中建立 LOD300^⑦ 精度小学建筑完整的 BIM 模型。一方面为能耗模拟提供基本的形体参数，另一方面，建筑工程量清单可通过 Revit 软件导出的明细表提取，用于计算建筑隐含碳排放（图 3）。

3.2.2 建筑材料组成与热工参数

基准建筑作为不同设计方案比选基础，根据《天津市公共建筑节能设计标准（DB29-153—2014）》^[52]《通用规范》^[45]《中小学校设计规范（GB 50099—2011）》^[53]中的最低要求进行定义。围护结构的热工性能等于或优于国家和地方建筑节能标准（表 6）中的底线值。南立面的窗墙比设置为 0.40，其他方向的窗墙比设置为 0.25，主体结构为钢筋混凝土。建筑主要构件的材料组成选择天津地区同类建筑常用的构造做法进行设定。建筑

的使用寿命定义为 50 年。

选取 IES-VE 作为整个设计过程中的能耗模拟工具。根据节能建筑或学校建筑的设计标准（表 7）设置供暖和制冷时间表、系统效率、气密性和居住人数等参数。

3.2.3 建筑生命周期碳排放的计算

基于上述数据，依据《碳排放标准》对基准建筑生命周期各阶段进行碳排放计算。结果如表 8 所示。生命周期碳排放强度低于宏观目标下的 64.2 kg CO₂/m²/a，处于《通用

表 6 国家标准及基准建筑外围护结构热工参数 [W/ (m² · K)]^[45, 52]

	国家标准 ^[45]	地方标准（天津市） ^[52]	基准建筑参数选择及构造做法	
屋顶	0.40	0.35	0.35	细骨料钢筋混凝土：40mm 1：3 水泥砂浆找平层：20mm XPS：85mm 水泥膨胀珍珠岩：30mm 钢筋混凝土楼板：120mm 水泥和油漆面层：10mm
外墙	0.50	0.45	0.4	内墙水泥砂浆和油漆抹面：15mm 混凝土空心砌块：200mm 岩棉保温板：80mm 钢丝网抹面层 5mm 外墙水泥砂浆和油漆抹面：15mm
外窗	2.5 (0.2< w/w< 0.3); 2.0 (0.3< w/w< 0.4); 1.9 (0.4< w/w< 0.5)	2.0 (N);2.3 (E,W); 2.5 (S)	2.0	隔热断桥铝合金 5 透明 +12A+5 透明 +12A+5Low-E 窗
天窗	2.4	2.3	2.2	隔热断桥铝合金 5 透明 +12A+5Low-E 窗

规范》^[45] 中的碳排放规定范围。

3.3 基准评价的结果表达

在政策层中主要计算了我国建筑在宏观目标和国家节能标准下生命周期碳排放基准值，本体层的数值范围则主要基于案例实践，二者的计算结果可相互补充、对比与验证。通过对计算结果进行分析，将单体建筑的减碳幅度与政策层中相应的节能目标等级对应，划分简洁的性能等级，实现可读性强的评价结果表达，从而为设计师提供简明有效的结果反馈。

其中，基于我国 2030 碳强度目标推算出的政策层基准值可作参考建筑必须要达到的底线值。在此基础上，对参考建筑进行减排率的节能等级设定（表 9）：参考建筑的生命周期碳排放为 E 等级，在此基础上降低 10%，为 D 等级，主要对应基于《2016 节能标准》中引导值的推导结果，并符合《通用规范》中碳减排率的要求，作为底线范围。

C-B 等级对应符合《近零标准》中超低能耗与近零能耗建筑的综合节能率的情况，在基准建筑的基础上减排 20% 和 40% 以上，作为参考范围。为达到 2060 年的碳中和目标，普及超低能耗、近零能耗及更高节能水平的建筑是必经之路。由于建筑寿命较长，因此，现阶段有条件的地区和建筑，应尽量提高建筑能效，降低碳排放，避免后期因节能改造造成重复投资和能源消耗。

A 等级向现阶段新建建筑提出了更高的目标，即运行阶段达到零能耗，由于这类建筑需要更高性能的围护结构和设备体系，在生命周期阶段仍存在隐含碳排放。A+ 等级为最高目标，即建筑能够平衡自身生命周期全部碳排放甚至达到负碳排放的水平，也是节能建筑在环境中的最理想的运行方式。

4 基准设定工作的建议

在基准值建立的过程中，数据来源、计算量和可验证性是几个比较大的制约条件。因此，建筑生命周期碳排放基准值体系的建立，同样需要从宏观的“政策层”和微观的“本体层”两方面进行推导和验证。

4.1 国家和地区层面

（1）加快完善本土建筑行业生命周期基础数据库，开发统一的生命周期工具以方便开展针对建筑的计算工作。

（2）制定相关的技术导则，提高建筑生命周期性能核算与评级在建筑可持续评价中的比重，鼓励建筑进行全面的生命周期评价。一方面为建筑 LCA 基准值的建立奠定单体数据基础，另一方面也促进了建筑设计方法和思维方

表 7 根据标准定义的能耗模拟参数^[3, 45, 52-54]

参数	说明	参数值
供热系统	天然气区域供热	燃烧效率：92% 传输效率：92%
制冷系统	单体空调	SEER=4.0
气密性	渗透率	0.6 ach
通风系统	新风	24m ³ / (h·人)
	热回收	65%
人员在室率	单人平均面积 (960 学生 + 120 教员)	8m ² / 人
办公设备	7:00—18:00, 工作日	5W/m ²
照明	日照 < 300 lx, 室内照明开启	9W/m ²
日照	教室窗地比	1 : 5

表 8 基准建筑生命周期碳排放计算结果

生命周期阶段	结果 (kgCO ₂)	比例
建材生产	6.99E+06	20.3%
材料运输	1.50E+05	0.4%
施工	6.02E+05	1.7%
运行	2.44E+07	70.6%
维修替换	1.65E+06	4.8%
拆除处理	4.32E+05	1.3%
回收利用	3.05E+05	0.9%
总计	3.45E+07	100%
生命周期碳排放 (kgCO ₂ /m ² /a)	5.34E+01	

表 9 具体节能目标等级的划分及含义

节能目标等级	政策层	本体层（小学建筑）	减碳幅度设定	对应节能等级	
2016 节能标准（约束值）	91.1（小学建筑）				
2016 节能标准（目标值）	76.4（小学建筑）				
2030 GDP 碳减排目标推导值	64.2（公共建筑平均）				
通用规范（约束值）	59.8（小学建筑）	53.4	0	E	底线范围
通用规范（目标值）	51.0（小学建筑）	48.1	-10%	D	
超低能耗建筑	43.0（小学建筑）	42.7	-20%	C	参考范围
近零能耗建筑	32.8（小学建筑）	32.0	-40%	B	
零能耗建筑	13.4（小学建筑）	13.4	-75%	A	目标范围
生命周期零碳建筑	0.0（小学建筑）	0	-100%	A+	

式的转变。

（3）建立建筑 LCA 的信息收集平台，为后续基准值的计算积累真实可靠的样本数据，并制定数据入库和处理的具体流程，进行数据的处理与筛选并定期总结与公布统计数据。国内关于建筑生命周期的研究大多是理论与独立案例相结合，很少有大量全面计算区域或同类型

建筑基准值的研究，原因是数据零散，收集难度大，且计算工作量庞大，个人精力难以完成，而平台信息集合的方式可以降低数据收集的难度，提高统计分析的效率。为方便基准值的采样，设计了附表 A 的模板进行建筑单体 LCA 结果录入。

4.2 建筑单体层面

建筑单体数据的收集是建立基准值“大厦”的基础“砖石”，因此，单体建筑的样本录入对基准值体系的建立尤为重要。将生命周期评价方法融入建筑早期设计，不仅对方案的决策有很大的辅助意义，同时可为 LCA 基准值计算结果提供基础数据。

单体建筑需配合建立国家或区域建筑样本库，应用统一的软件和数据录入模板，提供方案的 LCA 计算结果。随着样本库的不断充实，

基准值得以实时调整，为政策制定、市场导向、新建建筑决策提供参考依据。

5 结语

本文梳理了国内外关于建筑生命周期碳排放基准评价的方法，从三个不同的层级分析了各类方法的特点及适用场景，结合中国的碳排放目标、建筑标准及实践，提出了自上而下与自下而上相结合建立我国建筑生命周期碳排放基准值的方法。以寒冷地区小学建筑为例，从

政策层面推导了普通节能、超低能耗、近零能耗及使用阶段零碳建筑的生命周期碳排放基准值（表 3）；从建筑本体层面通过内部比较的方式，基于课题组开发的 BIM-LCA 方法，计算了基准建筑的生命周期碳排放（表 8）。二者得出的结论能够相互验证（表 9）。最后，提出了评价结果的可视化表达方法。由于数据与专业的局限性，文中提出的方法尚需进一步完善，只有通过相关从业者群策群力，才能建立兼具科学性和可操作性的建筑碳排放基准评价方法。

图片来源

图 1：作者自绘。
图 2 (a, b)：引自 <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015228240-Green-Material-Benchmarks>, 2021。
图 3：作者自绘。

注释

- ① BNB 为德国的可持续建筑评价体系（Bewertungs system Nachhaltiges Bauen）。
- ② KP-H 为瑞士建筑成本法规 SN 506 500 中的建筑成本规划与建筑施工规范（Baukostenplan Hochbau）https://planerwissen2go.com/wp-content/uploads/2017/11/PLANERWISSEN2go-Auszug-BKP2017_de.pdf。
- ③ One Click LCA 中将同类材料的碳排放顺序排列，其中表现最好的（前 20%）为“非常低（Very Low）”，并获得深绿色的“碳云”。并且以从绿色到红色的颜色梯度显示。表现最差的 20% 的材料将标有“非常高（Very High）”，并具有深红色碳云。
- ④ Ecopoint 分数为针对生命周期评价结果的单一数值，从 BRE 环境简介（Environmental Profile）方法中确定的 11 个影响类别的综合结果中获得。设计方案取得的 Ecopoint 越多，对环境的影响就越严重。<https://www.bregroup.com/hrf-faq/what-is-an-ecopoint-how-can-i-explain-ecopoints-to-my-colleagues/>。
- ⑤ 缩写分别代表的指标为：GWP（全球变暖潜值，Global warming potential），FW（淡水净使用量，Net use of fresh water），ODP（臭氧破坏潜值，Depletion potential of the stratospheric ozone layer），AP（酸化潜值，Acidification potential），EP（富营养化的潜值，Eutrophication potential），RWD（放射性废物处理，Radioactive waste disposed），ADP（非生物资源消耗潜值，Abiotic depletion potential for non-fossil resources），POCP（对流层臭氧形成潜值，Formation potential of tropospheric ozone），HWD（危险废物处理，Hazardous waste disposed），NHWD（非危险废物处理，Non-hazardous waste disposed），PENr（不可再生一次能源消耗量，Non-renewable primary energy demand），Per（可再生一次能源消耗量，Renewable primary energy demand）。
- ⑥ 欧盟标准 BS EN 15643-2 定义的生命周期范畴：EN 15643-2. Sustainability of construction works –

- assessment of buildings – Part 2: framework for the assessment of environmental performance. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization; 2011.
- ⑦ LOD300 精度下的 BIM 模型包含了建筑构件在数量、尺寸、形状、位置和朝向方面详细的参数信息，可以提供相对完整的建筑 LCA 计算。
 - ⑧ 根据《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366—2019）中的建筑生命周期阶段进行划分。用“√”表示建筑样本的生命周期结果中包含此阶段。
 - ⑨ 列出建筑生命周期评价常用的环境影响指标，用“√”表示建筑样本选择相应的指标进行生命周期结果的计算。

参考文献

- [1] Galindro BM, Zanghelini GM, Soares SR, Use of benchmarking techniques to improve communication in life cycle assessment: A general review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, Volume 213, 143-157.
- [2] Technical Committee. ISO - ISO 21678-2020 Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works[S]. International Organization for Standardization, 2020-06.
- [3] GB/T51161-2016. 民用建筑能耗标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.
- [4] 朱能，朱天利，全丁丁，等. 我国建筑能耗基准线确定方法探讨 [J]. 暖通空调, 2015, 45(03):59-64.
- [5] Attia S, Shadmanfar N, Ricci F, Developing two benchmark models for nearly zero energy schools[J]. Applied Energy, 2020, Volume 263, 114614.
- [6] 高源. 整合碳排放评价的中国绿色建筑评价体系研究 [D]. 天津：天津大学, 2014.
- [7] Hollberg A, Lützkendorf T, Habert G, Top-down or bottom-up? – How environmental benchmarks can support the design process[J]. Building and Environment, 2019, 153: 148-157,
- [8] Russell-Smith SV, Lepech MD, Fruchter R, Meyer YB. Sustainable target value design: integrating life cycle assessment and target value design to improve building energy and environmental performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88: 43-51.
- [9] König H, Cristofarom. Life Cycle Costs and Life Cycle Assessment benchmarks for residential

- buildings in Germany[Z] 2012.
- [10] 彭渤. 绿色建筑全生命周期能耗及二氧化碳排放案例研究 [D]. 北京：清华大学, 2012.
 - [11] U.S. Energy Information Administration, Commercial buildings energy consumption survey [EB/OL]. <https://www.eia.gov/consumption/commercial/index.php>, 2021
 - [12] Resch E, Andresen I, A Database Tool for Systematic Analysis of Embodied Emissions in Buildings and Neighborhoods[J]. Buildings, 2018, 8. 106.
 - [13] Rucińska J, Komerska A, Kwiatkowski J. Preliminary Study on the GWP Benchmark of Office Buildings in Poland Using the LCA Approach[J]. Energies, 2020, 13: 3298
 - [14] Lavagnam, Baldassarri C, Campioli A, Giorgi S, Valle AD, Castellani V, Sala S, Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock[J]. Building and Environment, 2018, 145: 260-275.
 - [15] Dascalaki EG, Argiropoulou PA, Balaras CA, et al. Benchmarks for Embodied and Operational Energy Assessment of Hellenic Single-Family Houses[J]. Energies, 2020, 13: 3298
 - [16] 任彬彬. 寒冷地区多层办公建筑低能耗设计原型研究 [D]. 天津：天津大学, 2014.
 - [17] 杨崴，于汉泽. 生命周期环境影响与成本目标下的建筑设计优化方法 [J]. 建筑学报, 2021, 02: 35-41.
 - [18] 杨崴，羊思静. 基于 LCA 性能的高层住宅建筑设计参数敏感度研究 [J]. 建筑节能, 2020, 48(12):15-23.
 - [19] Szalay Z. Life cycle environmental impacts of residential buildings [D]. Budapest University of Technology and Economics, 2007.
 - [20] Shaun, Green material benchmarks [EB/OL]. <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015228240-Green-Material-Benchmarks>, 2021.
 - [21] 郑婷. 建筑构件的生命周期碳排放和经济性综合评价方法研究 [D]. 西安：西安建筑科技大学, 2019.
 - [22] Shaun, Carbon Heroes Benchmarks [EB/OL]. <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015230580-Carbon-Heroes-Benchmarks>, 2021.
 - [23] 中国建筑科学研究院，中国建筑能耗基准工具研究 [EB/OL]. <https://www.efchina.org/Attachments/Report/>

report-20111030-zh/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%BB%BA%E7%AD%91%E8%83%BD%E8%80%97%E5%9F%BA%E5%87%86%E5%B7%A5%E5%85%B7%E7%A0%94%E7%A9%B6.pdf

[24] 魏莱, 党睿, 等. 购物中心被动设计节能潜力的标准化模拟 [J/OL]. 重庆大学学报 :1-14[2021-10-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20191024.1429.002.html>.

[25] 刘璐. 生命周期视角下城市住宅建筑存量更新策略的环境影响与经济效益研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.

[26] Ganassali S, Lavagnam, Campioli A. LCA benchmarks in buildings environmental certification systems [C]// 41 ° IAHS World Congress. Albufeira: Environmental Benchmark LCA based for costruction sector, 2016.

[27] Doran D, Building LCA benchmarks – BREEAM UK New Construction 2018 [EB/OL]. <https://www.breeam.com/news/building-lca-benchmarks-breeam-uk-new-construction-2018/>, 2019

[28] DGNB GmbH, DGNB 认证体系新建建筑标准集 : 2020 国际版中文 [EB/OL]. <https://www.dgnb-system.de/en/system/version-2020-international/china/>, 2020

[29] U.S. Green Building Council(USGBC), LEED v4.1 Building Design and construction[EB/OL]. <https://www.usgbc.org/leed/v41#bdc>, 2021.

[30] Trigaux D, Allacker K, Debacker W. Environmental benchmarks for buildings: a critical literature review[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020.

[31] Politi S, Antonini E, Wilkinson SJ. Overview of Building LCA from the Sustainability Rating Tools Perspective[C] ZEMCH 2018. Melbourne (AU), 2018.

[32] Frischknecht R, Balouktsim, Lützkendorf T, et al. Environmental benchmarks for buildings: needs, challenges and solutions—71st LCA forum[C] The International Journal of Life Cycle Assessment. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology, 2019.

[33] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话（全文）. [EB/OL]. http://news.cnr.cn/native/gd/20201002/t20201002_525286017_1.shtml.

[34] 国务院. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——习近平在气候雄心峰会上的讲话 [EB/OL]. 2020.12.12. http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5570055.html.

[35] 中华人民共和国生态环境部. 中国气候变化第三次国家信息通报及第二次两年更新报告核心内容解读 [EB/OL]. 2019.07.01. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtgz/201907/t20190701_708248.shtml.

[36] 李平, 娄峰, 王宏伟. 2016—2035 年中国经济总量及其结构分析预测 [J]. 中国工程科学, 2017,19(1):13-20.

[37] 中国建筑节能协会能耗统计专业委员会, 中国建筑能耗研究报告 2020[EB/OL]. <https://24959527.s21i.faiusr.com/61/ABUIABA9GAAGuJHP-wUozLXhgwM.pdf>, 2020.

[38] 戚仁广, 凡培红, 丁洪涛. 碳中和背景下我国建筑面积预测 [J]. 建设科技, 2021,11: 14-18.

[39] 龙惟定, 梁浩. 我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨 [J]. 暖通空调, 2021, 51(04): 1-17.

[40] 潘毅群, 梁育民, 朱明亚. 碳中和目标背景下的建筑碳排放计算模型研究综述 [J]. 暖通空调, 2021,51(07):37-48.

[41] 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能 (中英文),2021,49(02):1-6.

[42] Zhang S, Yang X, Xu W, et al. Contribution of nearly-zero energy buildings standards enforcement to achieve carbon neutral in urban area by 2060[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(5): 734-743.

[43] 张时聪, 王珂, 杨芯岩, 等. 建筑部门碳达峰、碳中和排放控制目标研究 [J]. 建筑科学, 2021,37(08):189-198.

[44] 中国建筑节能委员会清洁供热产业委员会 (CHIC). 中国清洁供热产业发展报告 (2020) 精简版. [EB/OL]. <http://image.chic.org.cn/20210113180925/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E6%B8%85%E6%B4%81%E4%BE%9B%E7%83%AD%E4%BA%A7%E4%B8%9A%E5%8F%91%E5%B1%95%E6%8A%A5%E5%91%8A%EF%BC%882020%EF%BC%89%E7%B2%BE%E7%AE%80%E7%89%8820200110.pdf>.

[45] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: (GB55015—2021)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[46] 徐伟, 等. 近零能耗建筑技术标准: GB/T51350-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[47] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准: GB/T51366-2019[S]. 建筑碳排放计算标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[48] 杨芯岩, 于震, 张时聪, 等. 近零能耗公共建筑示范工程全寿命期碳排放研究 [J]. 建筑科学, 2023,39(02):20-27.

[49] 赵玉清, 侯向阳, 唐胜世, 等. 基于全寿命期的近零能耗建筑经济性与碳排放量分析 [J]. 建筑节能, 2020,48(08):126-130.

[50] 李奇芫, 杨向群, 杨威. 基于 BIM 的小型节能建筑生命周期环境影响和成本分析 [J]. 南方建筑, 2017, 178(2):45-50.

[51] 张时聪, 吕燕捷, 徐伟. 64 栋超低能耗建筑最佳案例控制指标和技术路径研究 [J]. 建筑科学, 2020,36(06):7-13+135.

[52] 天津市建筑设计院. 天津市公共建筑节能设计标准: DB29-153-2014[S]. 天津: 天津市住房和城乡建设委员会, 2014.

[53] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中小学校设计规范 :GB 50099—2011.[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[54] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准 :GB 50189-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

附表 - 建筑单体 LCA 计算结果录入模板

项目名称:					
样本库代码			建筑类型		
项目地点			建造时间		
所属气候区			建造寿命 / 年		
建筑层数			建筑面积 /m ²		
满足节能标准	(《通用规范》/ 超低能耗 / 近零能耗)		引用数据库		
系统边界 [®]	建材生产	√	环境影响指标 ^{®®}	GWP	√
	建材运输			PED	√
	建造施工	√		ODP	√
	维修替换	√		AP	√
	建筑运行	√		EP	
	拆除处理	√		POFP	
	回收利用			RI	√
生命周期阶段 [®]	GWP	PED	ODP	AP	RI
建材生产					
材料运输					
建筑施工					
替换维修					
运行能耗					
拆除处理					
回收利用					